



# (12)实用新型专利

(10)授权公告号 CN 206876374 U

(45)授权公告日 2018.01.12

(21)申请号 201720652805.3

(22)申请日 2017.06.07

(73)专利权人 中国空气动力研究与发展中心低  
速空气动力研究所

地址 621000 四川省绵阳市二环路南段6号

(72)发明人 肖春华 乔宝英

(74)专利代理机构 成都九鼎天元知识产权代理  
有限公司 51214

代理人 沈强

(51) Int. Cl.

G01M 9/06(2006.01)

(ESM)同样的发明创造已同日申请发明专利

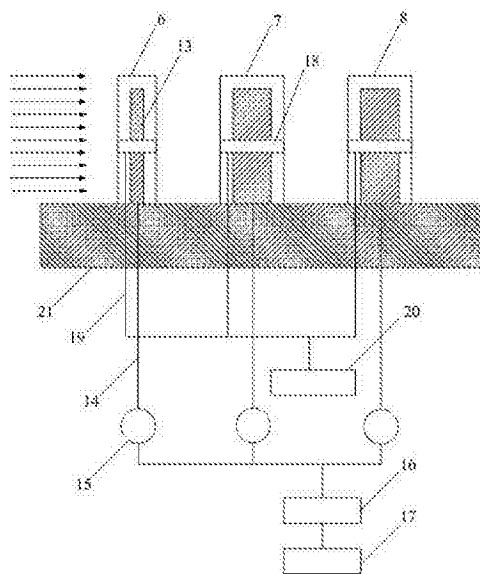
权利要求书1页 说明书8页 附图2页

## (54)实用新型名称

一种过冷水滴结冰探测装置

## (57)摘要

本实用新型公开了一种过冷水滴结冰探测装置,包括设置在测试表面的圆柱阵列,所述圆柱阵列包括沿着同一轴线依次设置三个直径互不相等的圆柱,圆柱的排列从一端到另一端直径逐步增加,相邻两个圆柱表面不接触,所述圆柱内为空腔结构,所述空腔结构内设置有振动件,所述圆柱表面设置有加速度传感器,与振动件和加速度传感器连接有信号采集系统;本实用新型结合了传统的力学结冰探测方法,克服了其无法区别大、小尺度过冷水滴的缺陷,充分发挥了传统力学结冰探测的优点,较好的协调了兼顾大尺度过冷水滴和小尺度过冷水滴结冰探测这两个矛盾,较好地解决飞机表面的结冰探测问题,这对于解决飞行器防除冰系统的设计和保障飞行安全均有着现实的意义。



1. 一种过冷水滴结冰探测装置,其特征在於包括设置在测试表面的圆柱阵列,所述圆柱阵列包括沿著同一轴线依次设置三个直径互不相等的圆柱,圆柱的排列从一端到另一端直径逐步增加,相邻两个圆柱表面不接触;

所述圆柱内为空洞结构,所述空洞结构内设置有振动件,所述圆柱表面设置有加速度传感器,与振动件和加速度传感器连接有信号采集系统。

2. 根据权利要求1所述的一种过冷水滴结冰探测装置,其特征在於所述圆柱阵列沿著空气的来流方向分为第一圆柱、第二圆柱和第三圆柱,空气流的上撞击极限流线和下撞击极限流线是绕过第一圆柱前缘上表面和下表面的临界空气流线,所述第二圆柱和第三圆柱的设置在上撞击极限流线和下撞击极限流线之间的范围内。

3. 根据权利要求2所述的一种过冷水滴结冰探测装置,其特征在於所述第二圆柱的直径等于第二圆柱直径所在区域的上撞击流线和下撞击流线之间的距离。

4. 根据权利要求3所述的一种过冷水滴结冰探测装置,其特征在於第三圆柱的直径等于第三圆柱直径所在区域的上撞击流线和下撞击流线之间的距离。

5. 根据权利要求1所述的一种过冷水滴结冰探测装置,其特征在於所述信号采集系统包括动态分析模块,所述动态分析模块的信号输入端分别连接到圆柱上的加速度传感器。

6. 根据权利要求5所述的一种过冷水滴结冰探测装置,其特征在於所述信号采集系统包括功率放大器,所述功率放大器通过各自的开关连接到每一个圆柱内的振动件上。

## 一种过冷水滴结冰探测装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及空气动力学领域,具体的说涉及一种用于在高空结冰气象条件下(对各种容易结冰的对象开展结冰探测的方法和装置。

### 背景技术

[0002] 结冰是飞行实践中广泛存在的一种物理现象,是造成飞行安全事故的主要隐患之一。当飞机在环境温度低于冰点或在冰点附近的结冰气象条件下飞行时,大气中的过冷水滴撞击到飞机表面,结冰现象就很容易在机翼、尾翼、旋翼、进气道、风挡玻璃、天线罩、仪表传感器等部件表面发生。飞机结冰不仅增加了飞机的重量,而且破坏了飞机表面的气动外形,改变了绕流流场,破坏了气动性能,造成飞机最大升力下降、飞行阻力上升、操作性能下降、稳定性能降低,对飞行安全造成了很大的威胁,因结冰而引发的飞行事故屡见不鲜,严重的结冰甚至可以导致机毁人亡。

[0003] 1994年,美国ATR-72通勤飞机发生空难,事故调查组经过长时间的研究和分析,发现大尺度过冷水滴结冰是造成该飞行事故的主要原因,从而使得研究人员越来越重视大尺度过冷水滴结冰的研究和探测。大尺度过冷水滴结冰(SLD,supercooled large droplet)是FAR 25附录C中平均水滴直径大于50微米的过冷水滴。这种尺度的过冷水滴由于体积大、质量重、惯性大,气流跟随性较差,容易发生变形、破碎等动力学现象,其运动轨迹与小尺度过冷水滴有较大的区别,同时,在冻结的过程中热量释放速度缓慢,使得其在飞行器表面无法立刻发生冻结,一部分液态水溢流到防冰表面的下游,从而在防冰区外形成无法防除的冰脊现象,这种冰脊对飞行安全的危害比前缘结冰更大、更加无法预测和控制,是防冰系统设计必须重点关注的问题。而在大、小尺度过冷水滴相互混合的复杂结冰气象条件下,设计和研制一种可以区分大、小尺度过冷水滴的结冰探测方法和相关的装置,是为飞行器防冰系统提供合理触发信号的关键。

[0004] 目前的结冰探测装置主要由光学、力学、电学等原理进行设计。最初的光学结冰探测装置是依靠飞行员的眼睛,后来逐渐采用具有CCD高感光元器件的相机或摄像机。由于飞行器飞行的环境比较恶劣,经常处于穿云飞行的状态,因此,在这种云雾较大的环境下,这种原理的结冰探测装置局限性较大,很容易发生误判的情况。现在,光纤结冰探测装置可以克服对周围云雾环境的影响,开始成为非接触结冰探测的研究热点。这种结冰探测是通过光反射、散射和透射等原理进行结冰探测的方法。但是,这种探测方法也有缺点,光纤的发射端并不是一个点光源,而是具有较大直径的面光源,而且其发射的光线有很大一部分,由于在穿过冰这种特殊的多孔介质材料时发生了损耗和偏折等现象,造成了测量精度和准确度较大的依赖于光纤发射端形状、尺寸和面积等,并且受结冰的内部结构特征影响很大,这是目前这种结冰探测装置经常报虚警或测量误差较大的关键原因。电学方法的结冰探测装置是利用导电丝在结冰状态下其电阻受到变化的规律而设计的一种结冰探测装置,但其过于敏感,即使雨滴或灰尘在其导电丝表面,也会产生信号的变化,从而影响结冰探测的准确性。

[0005] 力学方法的结冰探测装置仍然是目前主流的结冰探测装置,在各种型号的飞行器大量采用和应用,具有可靠性高的特点。力学方法的结冰探测装置是依靠各种产生振动的元器件或装置,对安装于飞行器表面的结冰探测棒进行振动,通过测量其固有振动频率,来估算其表面结冰质量的方法。但是这种方法也有很多问题,最为主要的缺陷就是无法区分大、小尺度过冷水滴的结冰条件,所以存在结冰探测精确性不够的缺点。而大、小尺度过冷水滴的结冰防护,对防冰系统的设计和能耗需求差异较大,是影响飞行安全的重要原因。目前,研究人员提出的SLD结冰探测器外形设计方法,均缺乏外形设计的依据,更多是依靠经验和直观的猜想进行设计。中国空气动力研究与发展中心的易贤等发明的SLD结冰探测器,与华中科技大学葛俊峰等发明的SLD结冰探测器,在设计方法上非常类似和接近,最终的外形也几乎相同,均是一扩一缩的菱形结构。而且这种结冰探测器在零飞行攻角或很小飞行攻角的飞行条件下,可能在区分大、小尺度过冷水滴的条件具有一定作用,但是在较大飞行攻角条件下,存在测量误差较大,甚至无法判别大、小过冷水滴的情况。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是针对上述传统力学结冰探测装置的缺陷,进行补充和改进的一种可以区分大、小尺度过冷水滴的新型结冰探测方法和装置。

[0007] 为实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0008] 一种过冷水滴结冰探测装置,包括设置在测试表面的圆柱阵列,所述圆柱阵列包括沿着同一轴线依次设置三个直径互不相等的圆柱,圆柱的排列从一端到另一端直径逐步增加,相邻两个圆柱表面不接触;

[0009] 所述圆柱内为空腔结构,所述空腔结构内设置有振动件,所述圆柱表面设置有加速度传感器,与振动件和加速度传感器连接有信号采集系统。

[0010] 在上述技术方案中,所述圆柱阵列沿着空气的来流方向分为第一圆柱、第二圆柱和第三圆柱,空气流的上撞击极限流线和下撞击极限流线是绕过第一圆柱前缘上表面和下表面的临界空气流线,所述第二圆柱和第三圆柱的设置在上撞击极限流线和下撞击极限流线之间的范围内。

[0011] 在上述技术方案中,所述第二圆柱的直径等于第二圆柱直径所在区域的上撞击流线和下撞击流线之间的距离。

[0012] 在上述技术方案中,第三圆柱的直径等于第三圆柱直径所在区域的上撞击流线和下撞击流线之间的距离。

[0013] 在上述技术方案中,所述信号采集系统包括动态分析模块,所述动态分析模块的信号输入端分别连接到圆柱上的加速度传感器。

[0014] 在上述技术方案中,所述信号采集系统包括功率放大器,所述功率放大器通过各自的开关连接到每一个圆柱内的振动件上。

[0015] 一种多圆柱阵列结冰探测方法,当空气流从远场流向多圆柱阵列,圆柱阵列具有三个处于同一轴线、且轴线方向与空气流场方向一致的三个圆柱,过冷水滴跟随空气流撞击到第一圆柱的表面,过冷水滴与第一圆柱表面撞击后的产生飞溅现象,飞溅出的过冷水滴跟随气流继续撞击到第二圆柱或第三圆柱的表面进行结冰;

[0016] 通过外部驱动使得各个圆柱进行振动,并通过圆柱表面数据采集获取圆柱表面的

振动频率、幅度和相位参数,用结冰后采集的圆柱表面参数与结冰前的圆柱表面参数进行计算获得过冷水滴的体积。

[0017] 在上述技术方案中,所述圆柱阵列包括沿着同一轴线依次设置三个直径互不相等的圆柱,圆柱的排列从一端到另一端直径逐步增加,相邻两个圆柱表面不接触。

[0018] 一种多圆柱阵列结冰探测方法,其特征在于空气流的上撞击极限流线和下撞击极限流线是绕过第一圆柱前缘上表面和下表面的临界空气流线,所述第二圆柱和第三圆柱的设置在上撞击极限流线和下撞击极限流线之间的范围内。

[0019] 在上述技术方案中,所述第二圆柱的直径等于第二圆柱直径所在区域的上撞击流线和下撞击流线之间的距离。

[0020] 在上述技术方案中,第三圆柱的直径等于第三圆柱直径所在区域的上撞击流线和下撞击流线之间的距离。

[0021] 在上述技术方案中,空气流中包括两种尺寸的过冷水滴,一种过冷水滴的平均直径不超过50微米,另一过冷水滴的平均直径超过50微米。

[0022] 在上述技术方案中,所述平均直径不超过50微米的过冷水滴在撞击过程中,其过冷水滴的运动流线与空气流线相同,过冷水滴与第一圆柱相撞,在第一圆柱表面进行结冰,且第二圆柱和第三圆柱表面不发生结冰现象。

[0023] 在上述技术方案中,所述第二圆柱和第三圆柱处于第一圆柱的上、下撞击极限流线上,也就是处于第一圆柱的水滴遮蔽区内。

[0024] 在上述技术方案中,所述平均直径超过50微米的过冷水滴在撞击过程中,其过冷水滴的运动流线与空气流线存在差异,过冷水滴的上、下撞击极限流线偏移小,过冷水滴与第一圆柱撞击后,飞溅出的水滴跟随气流撞击到第二圆柱或第三圆柱的圆柱前缘区域两侧进行结冰。

[0025] 在上述技术方案中,所述平均直径超过50微米的过冷水滴撞击到第一圆柱表面时,水滴不会马上结冰,部分未冻结的液态水往圆柱下游溢流,如果第一圆柱的表面周长不够发生冻结,未冻结的液态水将被气流吹到第二圆柱前缘区域表面,而在第二圆柱的前缘,部分未冻结的液态水同样的向圆柱下游溢流然后被气流吹到第三圆柱的前缘区域进行结冰。

[0026] 综上所述,由于采用了上述技术方案,本发明的有益效果是:

[0027] 本发明从另外一种视觉,采用最为简单的圆柱外形,利用圆柱这种外形对周围流场影响小的特点,通过多个圆柱的排列组合,实现大、小尺度过冷水滴探测的目的,具有非常容易实施、简单实用、适合各种攻角飞行条件的特点。

[0028] 本发明结合了传统的力学结冰探测方法,在此基础上,克服了其无法区别大、小尺度过冷水滴的缺陷,充分发挥了传统力学结冰探测的优点,较好的协调了兼顾大尺度过冷水滴和小尺度过冷水滴结冰探测这两个矛盾,较好地解决飞机表面的结冰探测问题,这对于解决飞行器防除冰系统的设计和保障飞行安全均有着现实的意义。

[0029] 本发明是针对结冰气象条件(包括实验模拟环境和真实大气环境下的结冰气象条件),采用多圆柱阵列结冰探测的方法,直接用于对飞行器、风力机和输电线路等容易结冰部位进行结冰探测的过程和目的。

## 附图说明

[0030] 本发明将通过例子并参照附图的方式说明,其中:

[0031] 图1是小尺度过冷水滴条件下多圆柱阵列结冰探测方法示意图;

[0032] 图2是大尺度过冷水滴条件下多圆柱阵列结冰探测方法示意图;

[0033] 图3是过冷水滴结冰探测装置示意图。

## 具体实施方式

[0034] 本说明书中公开的所有特征,或公开的所有方法或过程中的步骤,除了互相排斥的特征和/或步骤以外,均可以以任何方式组合。

[0035] 远场的过冷水滴分为两种,一是大尺度过冷水滴(平均直径超过50微米),二是小尺度过冷水滴(平均直径不超过50微米)。图1、图2中空气流1从远场流向多圆柱阵列,过冷水滴2跟随空气流撞击到或绕过多圆柱表面,小尺度过冷水滴(平均直径小于50微米的水滴)由于质量较低,惯性较小,则空气流跟随性好,其水滴的运动流线与空气流线几乎相同,空气流的上撞击极限流线3和下撞击极限流线4分别是绕过第一圆柱6前缘上、下表面的临界空气流线,相应的,小尺度过冷水滴的上、下撞击极限流线与3、4一致。通过数值计算,设计第二圆柱7的直径刚好等于上、下撞击流线之间的距离,这样,小尺度过冷水滴2通常只在圆柱前缘区域发生结冰5。而相应的,从理论和数值计算上分析,第二圆柱7、第三圆柱8表面不发生结冰现象,因为后面两个圆柱处于第一圆柱的上、下撞击极限流体内,也就是处于第一圆柱的水滴遮蔽区内,所以,通常没有过冷水滴撞击到第二圆柱和第三圆柱表面。而如果从远场跟随空气流流入的是大尺度过冷水滴2,由于其质量较高、惯性较大,气流的跟随性较差,因此,大尺度过冷水滴的运动流线与空气流线差异较大,更不容易发生偏折。所以,相应的上、下撞击极限流线偏移较小,这样就更容易在第二圆柱7和第三圆柱8的前缘区域两侧表面发生结冰现象9、10。而且,大尺度过冷水滴由于其体积和尺寸大,容易在跟随空气流动的过程中发生破碎,也容易在撞击到圆柱固壁表面时发生飞溅等现象,飞溅出固壁表面的部分水滴容易跟随气流撞击到后面的圆柱前缘区域两侧。同时,大尺度过冷水滴撞击到圆柱表面部分,由于其体积较大,不容易马上发生冻结,部分未冻结的液态水也容易往圆柱下游溢流,如果第一圆柱的表面周长不够发生冻结,未冻结的液态水将被气流吹到第二圆柱前缘区域表面。因此,第二圆柱前缘区域两侧表面将容易发生结冰现象。根据前面的分析,类似的,第三圆柱前缘区域两侧表面也将发生类似的结冰现象。

[0036] 利用质量守恒定律,针对小尺度过冷水滴,情况较为简单,第一圆柱表面的结冰量 $W_1$ 等于小尺度过冷水滴的上、下撞击极限流体内的过冷水滴质量,而针对大尺度过冷水滴,第一圆柱前缘表面发生大部分的结冰现象,第一圆柱结冰量( $W_1$ )、第二圆柱结冰量( $W_2$ )、第三圆柱结冰量( $W_3$ )的总质量( $W$ ),等于上、下撞击极限流体内的过冷水滴质量总和。再辅助于数值计算和理论分析,可以通过各个圆柱表面的结冰量,反推出大、小尺度过冷水滴的液态水含量和平均水滴直径。每个圆柱之间的间距和直径,也可以通过计算流体力学的方法进行确定。

[0037] 结冰探测装置组成如图3所示。

[0038] 图中:

[0039] 6是第一圆柱:这是本发明多圆柱阵列的第一个圆柱,是多圆柱阵列中最小直径的圆柱,主要用于收集小尺度过冷水滴和绝大部分的大尺度过冷水滴。

[0040] 7是第二圆柱:这是本发明多圆柱阵列的第二个圆柱,直径比第一圆柱略大,其直径  $D_1$  与空气流的上、下撞击极限流线之间的距离相等或接近,主要用于收集少量没有被第一圆柱收集到的过冷水滴,这部分过冷水滴由于体积大、质量重,发生破碎、飞溅等动力学现象的可能性更大,容易在气流的作用下撞击到第二圆柱、第三圆柱的前缘区域表面,从而在第二圆柱、第三圆柱前缘区域上下两侧形成角状的结冰外形。

[0041] 8是第三圆柱:这是本发明多圆柱阵列的第三个圆柱,直径比第二圆柱略大,功能是作为第二圆柱的补充,用于补充收集少量没有被前两个圆柱收集到的大尺度过冷水滴和未发生冻结的溢流水,从而在第三圆柱前缘区域两侧形成少量的结冰。

[0042] 13是振动元器件:这是一种轴向或径向振动的压电陶瓷或其它电控方式的高频振动元器件,或者机械方式的高频振动偏心轮,可以产生较高的振动频率,振动频率从几赫兹可到几千赫兹。由于不同质量条件下物体的固有振动频率是不同的,因此,根据固有振动频率与圆柱质量特性的关系,可以获得该圆柱表面的附加质量,从而可以得到圆柱表面的结冰质量,根据覆盖圆柱表面的结冰表面积以及冰层的密度等参数,可以获得平均的结冰厚度,以及单位时间内的结冰质量,也即结冰强度。

[0043] 14是电源线:这是连接于供电电源、功率放大器与振动元器件之间的导电线缆,起到传输电能的作用和功能。

[0044] 15是开关:这是用于控制供电电源与振动元器件之间通、断电功能的电子元器件。

[0045] 16是功率放大器:这是与任意函数发生器相连接的仪器,将函数发生器产生的不同类型信号进行偏置、滤波和增益,使振动的信号达到破坏或剥离冰层的要求。

[0046] 17是供电电源:这是为各种仪器、传感器提供电能的部件,可以将常规的220V工业电压进行整流、变压等,从而产生各种仪器、传感器所需的电源部件。

[0047] 18是加速度传感器:用于测量防冰部件表面产生振动所表现的加速度特性,以此来计算和分析振动频率、幅度和相位等参数。

[0048] 19是采集信号线:这是传输各种测量信号的线缆,用于连接各种仪器、传感器与数据采集模块,并将采集的电信号输入到数据采集模块中。

[0049] 20是动态分析模块:这是用于采集、分析加速度传感器所测量到的振动信号,可以获得结冰前、后防冰部件表面振动所产生的固有频率。通过测量压电纤维薄膜振动的固有频率,也可判断防冰表面是否结冰。如果防冰表面发生结冰,则压电纤维薄膜的固有频率将发生较大变化,如果表面没有发生结冰,则压电纤维薄膜的固有频率将保持不变。该固有频率与振动表面结冰的厚度、结冰类型等均有关,可以通过大量的实验进行标定,将振动表面的固有频率与结冰厚度、结冰类型关联起来,建立定量关系,为振动除冰过程调整振动频率、幅度和相位等参数提供判别和参考。

[0050] 21是结冰探测表面:这是本发明应用的对象,可以是飞机的机头、机身、机翼和尾翼表面,可以是风力机的叶片表面、输电导线表面,或者是高速列车等其它国民经济相关装备需要结冰探测的部件表面。

[0051] 本发明是基于多圆柱阵列的结冰探测方法和装置,利用最为普遍和最为简单的圆柱外形,根据大、小尺度过冷水滴的气流跟随性特征,大尺度过冷水滴的破碎、飞溅等动力

学特性,以及圆柱对不同尺度过冷水滴的收集特性而设计的一种可以区分大、小尺度过冷水滴的结冰探测方法和装置,这种新型结冰探测装置和方法,是在力学结冰探测方法基础上的一种升华,是利用机械或电控或电脉冲方式的振动方法对结冰探测圆柱进行周期性振动,采用加速度计或应变计等获得其振动频率和振动幅度参数,然后,根据圆柱固有振动频率与质量特性之间的关系,获得结冰探测圆柱表面的附加结冰质量和平均厚度等对飞行安全至关重要的参数,用于作为启动飞机除冰系统的信号和依据。

[0052] 首先,必须对每个干净的圆柱进行固有振动频率的计算和测量,获得其没有结冰条件下的振动频率等参数,作为圆柱表面结冰厚度和结冰质量计算的参考值;

[0053] 周期性启动圆柱内设置的机械方式振动凸轮、或电控方式的压电陶瓷或其它方式的振动元器件,周期性振动策略可以大量降低这种结冰探测所需的能量消耗,使其间断性的产生一定频率、幅度和相位的振动;

[0054] 利用圆柱表面设置的加速度计或应变计等传感器对圆柱的振动频率进行测量,获得的信号输入至动态分析模块中,进行固有频率的计算和分析;

[0055] 如果圆柱没有结冰现象,则其固有频率没有变化,函数发生器和功率放大器保持原有的振动参数及其增益、偏置等,保持步骤a的周期性振动策略;

[0056] 如果圆柱振动过程中遭遇了结冰,则该结冰圆柱的振动频率等参数将发生变化,采用加速度计或应变计等传感器测量结冰后的振动信号,并输入到动态分析模块中进行分析计算,获得结冰圆柱的固有振动频率;

[0057] 根据事前标定的结冰质量和结冰厚度与圆柱固有频率之间的关系,将结冰后的固有振动频率通过数据采集模块进行计算,并反馈至飞机除冰系统中,作为启动除冰的触发信号。

[0058] 圆柱间的距离和直径确定方法:

[0059] 1) 利用计算流体力学方法,采用低速不可压缩时均Navier-Stokes方程,对多圆柱阵列周围流场进行相应的数值模拟,获得多圆柱阵列周围的空气流场。

[0060] 2) 在多圆柱阵列周围流场数值计算的基础上,利用拉格朗日方法,根据牛顿第二定律,对流场入口的过冷水滴跟随空气流动的运动轨迹进行数值模拟,获得固定的过冷水滴上撞击极限流线(3)和下撞击极限流线(4),作为确定第二和第三圆柱直径的切线,重点获得临界平均水滴直径50微米的上、下撞击极限流线。相应的,第二圆柱直径(D2)和第三圆柱直径(D3)等于上、下撞击极限流线之间的距离。同时,第一圆柱和第二圆柱之间的间距H1、第二圆柱和第三圆柱之间的间距H2,不能过大,也不能过小,遵循中等间距的原则,在确定第二、第三圆柱的直径之后,由于针对不同尺度的过冷水滴,上、下撞击极限流线已经确定,因此,间距H1和H2也可以确定。或者先确定间距H1和H2,再通过固定的上、下撞击极限流线,确定第二、第三圆柱的直径(D2、D3)。

[0061]  $H1 \approx (D2 - D1) / 2$  (1)

[0062]  $H2 \approx (D3 - D2) / 2$  (2)

[0063] 3) 由于本发明涉及到大尺度过冷水滴,其在跟随空气流动的过程中,容易发生变形、破碎等动力学现象,阻力也会随相对雷诺数变化而发生改变,因此,小尺度过冷水滴的阻力选择经典的圆球阻力公式,而大尺度过冷水滴的阻力则在圆球阻力公式的基础上,增加变形、破碎等动力学特性的影响,使其运动轨迹的捕捉更加准确。



[0064] 4) 当过冷水滴靠近物体表面时,由于过冷水滴的惯性比空气质点的大,因此过冷水滴运动轨迹不会象空气质点的运动轨迹那么变化剧烈,将尽可能保持原来的运动轨迹和方向。对于大尺度过冷水滴,由于其质量和惯性更大,因此更容易偏离空气流线,从而形成变化更为缓慢的运动轨迹线,因此,这些大尺度过冷水滴也更容易撞击到第二和第三圆柱的前缘两侧,从而形成溢流冰。

[0065] 5) 在所有的过冷水滴运动轨迹簇中,与圆柱前缘的上、下表面相切的两条运动轨迹是上、下撞击极限流线。处于这两条运动轨迹之内的所有过冷水滴,都将撞击在圆柱表面。在两条相切的运动轨迹之外的过冷水滴,都将绕过圆柱而不会撞击到圆柱表面。在这两条相切的运动轨迹之内,撞击在圆柱表面上的过冷水滴数量就是过冷水滴对圆柱表面的撞击量。

[0066] 小尺度过冷水滴平均直径的确定方法:

[0067] 为简单起见,假定过冷水滴的直径是均匀一致的。

[0068] (1) 通过计算和实验,获得干净圆柱的固有振动频率 $F$ 。

[0069] (2) 在干净圆柱表面贴不同的附加质量 $W_i$ ,结合计算和实验,获得不同附加质量下的圆柱新的固有振动频率 $F_n$ ,并建立相关的频率和附加质量的标定关系式,为结冰探测提供标定数据参考。

[0070] (3) 将多圆柱阵列结冰探测系统放置到结冰风洞中,进行不同结冰气象条件下的结冰实验,并测量表面结冰圆柱的固有振动频率,与标定关系式进行比较,进一步修正固有频率 $F_n$ 和结冰附加质量 $W_i$ 之间的标定关系。

[0071]  $W_i = f(F_n)$  (3)

[0072] (4) 假设来流中的过冷水滴为小尺度过冷水滴,平均直径为 $D_w$ ,密度为 $\rho$ ,所以,单个过冷水滴质量 $dW$ 满足如下关系:

[0073]  $dW = \rho \cdot 4/3 \cdot \pi \cdot (D_w/2)^3$  (4)

[0074] (5) 根据振动探冰原理,结合前面的标定关系式,可以获得第一圆柱表面所结的冰质量为 $W_1$ ,冰层平均密度为 $\rho_1$ ,可以获得圆柱表面的结冰体积 $V_1$ 及其平均厚度 $h_1$ :

[0075]  $V_1 = W_1/\rho_1$  (5)

[0076]  $h_1 = W_1/(\rho_1 \cdot A_1)$  (6)

[0077] 其中, $A_1$ 是第一圆柱表面的结冰面积。

[0078] (6) 圆柱表面发生冻结的过冷水滴数量 $NW_1$ 也可以由下式获得:

[0079]  $NW_1 = W_1/dW$  (7)

[0080] 另外,圆柱表面的平均结冰厚度 $h_1$ 还可以根据如下关系式计算:

[0081]  $h_1 = NW_1 \cdot 4/3 \cdot \pi \cdot (D_w/2)^3/A_1$  (8)

[0082] (7) 假设来流中的过冷水滴液态水含量为 $LWC$ ,夹在上、下撞击极限流线之间的来流入口面积为 $A$ ,来流速度为 $V$ ,过冷水滴的冻结系数为 $\theta$ (比如小尺度过冷水滴在瞬间完成冻结,则 $\theta=1$ ,大尺度过冷水滴无法在瞬间完成冻结,则 $\theta<1$ ),在单位时间 $t$ 内,处于上、下撞击极限流线内的过冷水滴满足如下关系式:

[0083]  $W_1 = LWC \cdot V \cdot A \cdot t \cdot \theta$  (9)

[0084] 因此,还可以获得来流中的过冷水滴液态水含量 $LWC$ :

[0085]  $LWC = W_1/(V \cdot A \cdot t \cdot \theta)$  (10)

[0086] 或者,液态水含量LWC还可按如下公式计算:

$$[0087] \quad LWC = \frac{\rho_1 \times h1}{E_b \times V \times t} \quad (11)$$

[0088] 式中: $E_b$ ——圆柱表面的水收集系数,由计算流体力学计算方法获得;

[0089]  $V$ ——远场来流速度,m/s;

[0090]  $t$ ——结冰时间,s。

[0091] (8) 根据前面已经获得的液态水含量LWC,可以获得单位面积或单位体积内的过冷水滴质量。前面已通过数值计算获得了固定的上、下撞击极限流线,夹在两条极限流线之间的过冷水滴才会撞击到圆柱表面,而其它的过冷水滴则会跟随空气流远离圆柱。

[0092] 大尺度过冷水滴平均直径的确定方法类似于小水滴的方法,均满足步骤(1)-(4)及其相应的公式,区别在于在第二圆柱会发生结冰现象。

[0093] (9) 根据振动探冰原理,结合前面的标定关系式,可以获得第一圆柱表面所结的冰质量为 $W1$ ,冰层平均密度为 $\rho1$ ,可以获得圆柱表面的结冰体积 $V1$ 及其平均厚度 $h1$ :

$$[0094] \quad V1 = W1 / \rho1 \quad (12)$$

$$[0095] \quad h1 = W1 / (\rho1 \cdot A1) \quad (13)$$

[0096] 其中, $A1$ 是第一圆柱表面的结冰面积。

[0097] 第二圆柱表面所结的冰质量为 $W2$ ,冰层平均密度为 $\rho2$ ,可以获得圆柱表面的结冰体积  $V2$ 及其平均厚度 $h2$ :

$$[0098] \quad V2 = W2 / \rho2 \quad (14)$$

$$[0099] \quad h2 = W2 / (\rho2 \cdot A2) \quad (15)$$

[0100] (10) 第一圆柱表面发生冻结的过冷水滴数量 $NW1$ 也可以由下式获得:

$$[0101] \quad NW1 = W1 / dW \quad (16)$$

[0102] 第二圆柱表面发生冻结的过冷水滴数量 $NW2$ 也可以由下式获得:

$$[0103] \quad NW2 = W2 / dW \quad (17)$$

$$[0104] \quad NW3 = W3 / dW \quad (18)$$

$$[0105] \quad NW = NW1 + NW2 + NW3 \quad (19)$$

[0106] (11) 来流中的过冷水滴液态水含量LWC:

$$[0107] \quad LWC = (W1 + W2 + W3) / (V \cdot A \cdot t \cdot \theta) \quad (20)$$

[0108] 或者,液态水含量LWC还可按如下公式计算:

$$[0109] \quad LWC = \frac{\rho_1 \times (h1 + h2 + h3)}{E_b \times V \times t} \quad (21)$$

[0110] 本发明并不局限于前述的具体实施方式。本发明扩展到任何在本说明书中披露的新特征或任何新的组合,以及披露的任一新的方法或过程的步骤或任何新的组合。

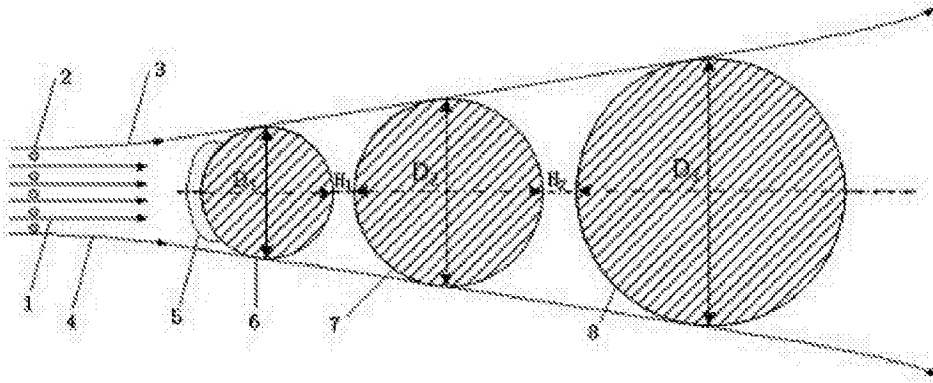


图1

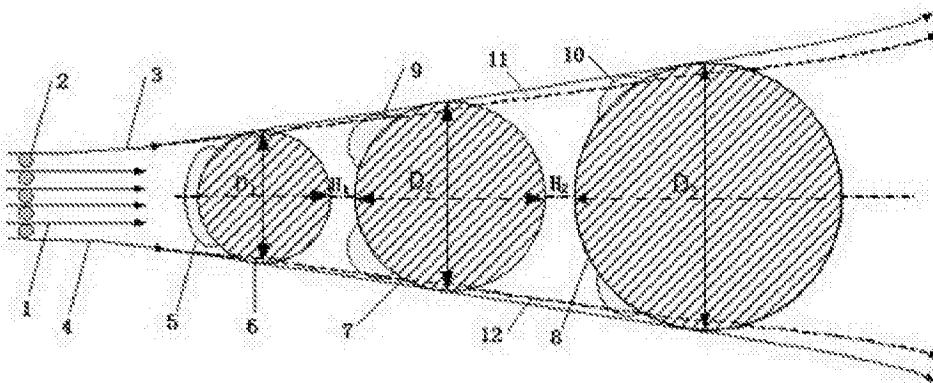


图2

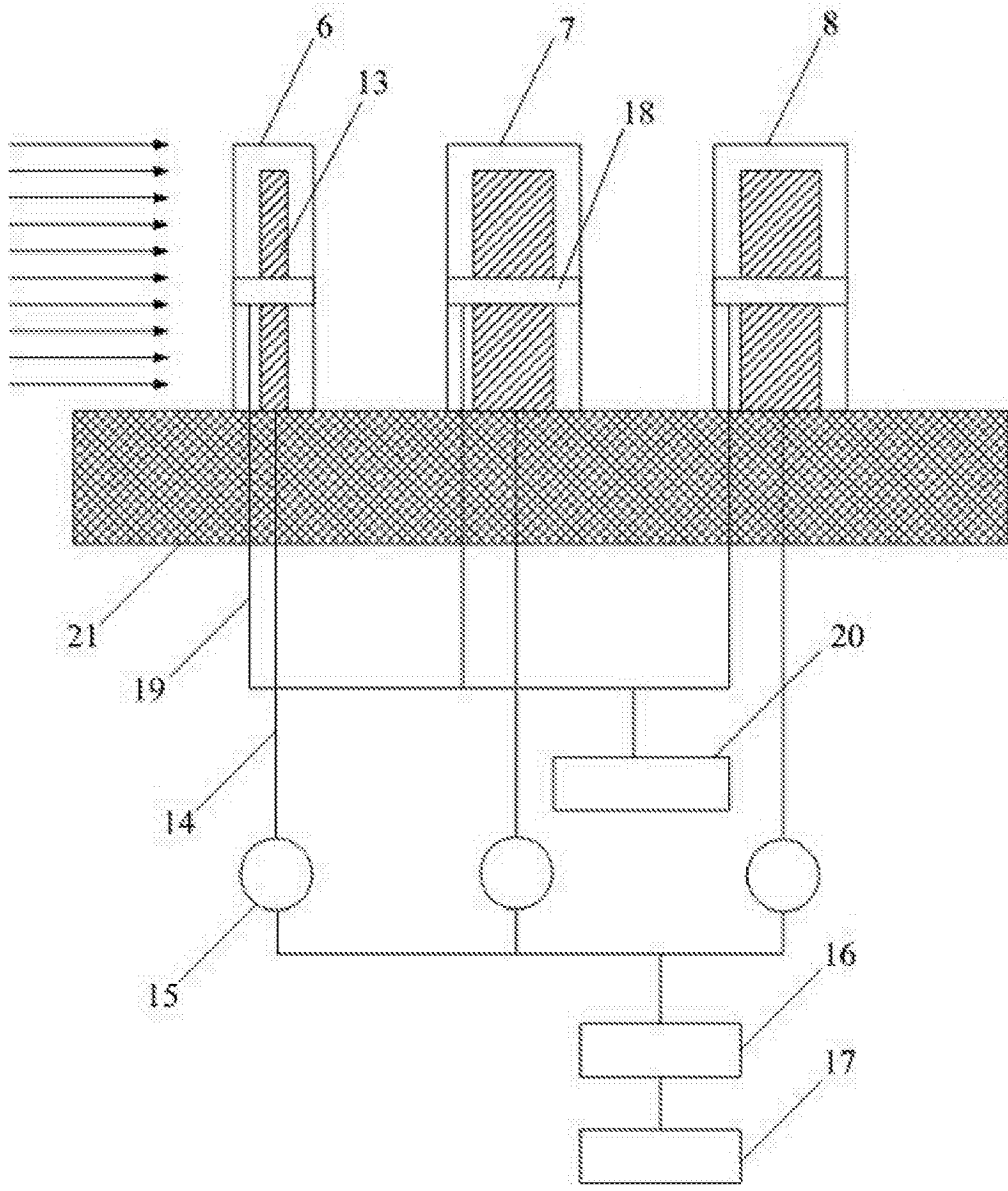


图3